

天山北坡中段雪岭云杉径向生长对气候变化的响应

周小东^{1,2}, 常顺利^{1,2}, 王冠正^{1,2}, 张毓涛^{2,3}, 喻树龙⁴, 张同文⁴

(1. 新疆大学生态与环境学院绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆天山森林生态系统国家定位观测研究站, 新疆 乌鲁木齐 830063; 3. 新疆林科院森林生态研究所, 新疆 乌鲁木齐 830063; 4. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆树轮生态重点实验室, 中国气象局树木年轮理化研究重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 分析树木径向生长对气候变化的响应, 有利于准确预测未来森林的动态变化。天山北坡中山带广泛分布着以雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)为单优树种的温带针叶林, 本研究采集该处高海拔雪岭云杉树芯样本, 用树木年轮学方法探究雪岭云杉径向生长对气候因子及干旱事件的响应特征。结果表明: (1) 1960—2020年, 雪岭云杉树轮宽度指数呈极显著上升趋势, 未出现生长衰退现象, 表明近期雪岭云杉生长状况良好。(2) 雪岭云杉树轮宽度主要与当年6—8月气温、4月降水及除当年7月外的各月scPDSI显著正相关; 滑动相关显示, 雪岭云杉树轮宽度与气候因子的关系不稳定, 1991年后, 云杉对气候因子的正响应进一步加强。(3) 雪岭云杉径向生长变化百分率在1879—1880年低于-25%, 表明其在1879—1885年发生了生长衰退; 随干旱频率和强度的增加, 雪岭云杉应对干旱事件的抵抗力和恢复力下降, 当云杉长时间处于水分较充足的环境而遭受突发干旱事件时, 会导致其抵抗力严重下降, 易发生生长衰退。综上所述, 在气候变化背景下, 升温在近期仍有利于该区域高海拔雪岭云杉径向生长, 但升温过程中伴随着干旱频率和强度的增加, 将使雪岭云杉的抵抗力和恢复力进一步下降, 生长衰退风险升高。即在近期, 雪岭云杉会在升温促进生长和干旱抑制生长间不断博弈, 最终产生何种影响需进一步观察研究, 未来应采取多种手段密切监测其生长动态。

关键词: 雪岭云杉; 树木年轮; 径向生长; 气候变化; 抵抗力; 恢复力; 天山北坡

全球气候变化使许多地区气温升高和降水格局改变, 并导致干旱的频率和强度增加, 且这一趋势在未来仍将持续^[1-2]。20世纪80年代中后期以来, 新疆全域尺度上表现为气温升高, 降水量增加, 呈“暖湿化”特征, 但1997年之后, 全疆70%以上的区域变干, 新疆气候出现了从“暖湿化”向“暖干化”转折的趋势^[3]。气候变化通过改变温度和水分有效性, 对树木产生特定的生理学压力影响其生长^[4], 其中, 干旱会导致树木生长衰退甚至死亡, 进而引发森林退化, 在贺兰山地区, 干旱导致油松(*Pinus tabulaeformis*)和青海云杉(*Picea crassifolia*)出现了生长下降现象, 且未来有加重可能^[5-6]; 在东北地区, 干旱使油松发生生长衰退, 油松分布边界有局地收缩和整体北移趋势^[7], 并导致山杨(*Populus davidiana*)的

死亡率远高于其他树种, 成片森林出现斑块状死亡现象, 森林结构发生了改变^[8], 这种抑制作用在升温明显、环境严苛的干旱和半干旱地区更为强烈^[9-11]。

树木年轮能忠实地记录树木径向生长过程中遭受的干旱等极端气候事件, 是衡量树木生长动态最客观、最敏感、最易识别和观察的指标之一^[12]。树木能否应对干旱, 主要取决于遭受干旱时是否有能力抵抗和干旱过后是否有能力快速恢复^[13], Lloret等^[14]以树木年轮为基础, 提出了抵抗力(Resistance, R_i)和恢复力(Recovery, R_c)等生态弹性指标。抵抗力弱的树木遭受极端干旱后易发生生长衰退, 而径向生长变化百分率(Growth Change, GC)可以判定树木是否发生生长衰退, 通过这些树木年轮数据可量化气候变化尤其干旱对树木影响的程度、持续时间

收稿日期: 2023-01-13; 修订日期: 2023-05-06

基金项目: 新疆林业生态基础类项目(XJLYKJ-2021-20); 国家科技支撑计划(2015BAD07B030304)

作者简介: 周小东(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态方面的研究。E-mail: 1106437442@qq.com

通讯作者: 常顺利。E-mail: ecocsl@163.com

以及空间范围^[15]。

研究发现,干旱半干旱地区低海拔处树木受到干旱的抑制作用最重^[16],而对于高海拔处,一种观点认为升温有助于解除低温限制,能促进树木生长,有利于林线爬升^[17],而另一种观点认为即便前期变暖一定程度促进了树木生长,但进一步持续升温引发的干旱胁迫也可能使树木从受低温限制转为受干旱限制^[18],遭受干旱事件后更容易出现生长停滞、下降甚至死亡^[19]。鉴于此相异观点,有必要在干旱半干旱区的高海拔森林开展针对性研究。

天山是对气候变率反应放大的生态敏感区域,该地区的气候变化能够很好的反映全球气候变化背景下的区域响应^[20],且有研究推测,天山山区未来可能会进入一个多年代降水偏枯时期^[21]。因此,亟需对天山高海拔树木开展气候变化的响应研究。在天山1760~2760 m的中山带阴坡和半阴坡广泛分布着以雪岭云杉为单优树种的温带针叶林,占天山林区总面积的90%以上^[22],对调节局域气候、促进碳循环等生态环境方面有十分重要的作用,且雪岭云杉年轮清晰、年代长、对气候响应敏感,是研究树木径向生长与气候关系的理想树种^[23]。对天山雪岭云杉以往的相关研究,主要集中在不同树种、胸径、树龄以及不同经度、坡向、海拔间树木与气候因子关系的差异分析上^[24-29],对于高海拔雪岭云杉

与气候变化尤其干旱的关系研究较少,且主要集中于东天山^[22],天山地区地形和气候异质性高,局部干湿差异大,有必要在不同区域开展针对性工作。因此,本研究采集天山北坡中段高海拔雪岭云杉的树木年轮样本,分析雪岭云杉径向生长对气候变化的响应特征,旨在探究以下科学问题:(1) 气候变化背景下,研究区高海拔雪岭云杉的径向生长特征如何?(2) 限制雪岭云杉径向生长的关键气候因子是什么,雪岭云杉与气候因子的响应关系是否稳定?(3) 干旱事件影响下雪岭云杉抵抗力、恢复力如何变化,是否发生了生长衰退现象,两者有何关系? 以为预测气候变化背景下该区域雪岭云杉林的分布范围和发展方向提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托天山森林生态系统国家定位观测研究站(87°07′~87°28′E, 43°14′~43°26′N)开展工作,研究区位于天山北坡中段乌鲁木齐河山区流域板房沟林场,属温带大陆性气候,覆盖研究区的CRU格点数据集显示(图1),1960—2020年期间该地区年平均最高气温5.13℃,年平均气温-1.65℃,年平均最低气温-8.43℃。一年中7月气温最高,月平均最高气温19.4℃,月平均气温11.9℃,月平均最低气温

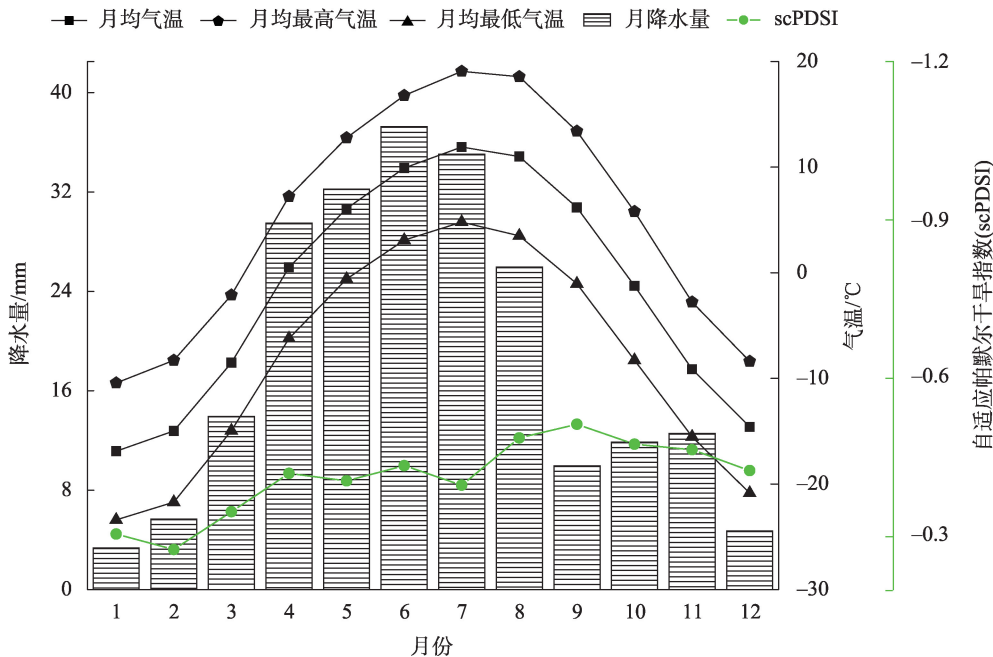


图1 研究区1960—2020年气候特征

Fig. 1 Climate characteristics of the study area from 1960 to 2020

4.5℃。1月气温最低,月平均最高气温-8.2℃,月平均气温-14.8℃,月平均最低气温-21.5℃。多年平均降水量222mm,其中4—8月降水量占到全年总降水量的72%。

1.2 样本采集与年表建立

在板房沟林场海拔2600m处布设采样点,选取立地条件基本一致且生长状况良好的雪岭云杉,在胸径1.3m处沿平行坡向和垂直坡向分别采集一个树芯样品,将树芯装入记录着采样信息的硬纸管中带回实验室。按照树木年轮分析基本流程^[30],将树芯晾干、固定、打磨后,利用显微镜进行目测定年,使用LINTAB5年轮分析仪(Rinntech, Heidelberg, Germany)测量轮宽,得到原始轮宽数据后使用PAST5程序交叉定年,再结合COFFCHA程序对交叉定年结果质量控制^[31],去掉与主序列相关性低的树芯,最终共保留28棵云杉的47根树芯,然后采用ARSTAN年表研制程序中的负指数函数消除云杉生长趋势^[32],最后用双权重平均法合并序列得到标准年表。

1.3 气象资料

考虑到采样点与附近气象站海拔等因素明显不同,且CRU格点数据在气候要素变化特征方面有着较高可靠性,具有长尺度、高分辨率等优点^[33-34],在树木年轮学中已广泛运用^[35],因此,本文采用荷兰皇家气象研究所数据共享网站(<http://climexp.knmi.nl>)的英国东安格利亚大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)精度为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的TS4.05数据集展开分析,提取覆盖采样点($43.00^{\circ} \sim 43.50^{\circ} \text{N}$, $87.00^{\circ} \sim 87.50^{\circ} \text{E}$)范围的1960—2020年月平均最高气温(T_{\max})、月平均气温(T)、月平均最低气温(T_{\min})、月降水量(p)以及自适应帕默尔干旱指数(scPDSI)。

scPDSI是个改进的指数,在PDSI的基础上考虑了与各个位置土壤表面特性相关的固定参数,使不同气候条件下的结果更具准确性和可比性,对地区干旱情况更具代表性^[36-37]。scPDSI为正值表示气候湿润,为负值表示气候干旱,负值越小表示气候越干旱。根据scPDSI干旱等级评定标准^[38]: $-2 < \text{scPDSI} \leq -1$ 表示轻旱; $-3 < \text{scPDSI} \leq -2$ 表示中旱; $-4 < \text{scPDSI} \leq -3$ 表示重旱; $\text{scPDSI} \leq -4$ 表示极旱。根据研究区 $\text{scPDSI} \leq -2$ 挑选出的干旱事件发生年份为1962年、1968—1969年、1978—1979年、1981年、

2020年(图2)。干旱频率为年内 $\text{scPDSI} \leq -2$ 的干旱月数占总月数的比值,干旱强度为年内 $\text{scPDSI} \leq -2$ 的累积月数与年内连续干旱月数之比^[39]。

1.4 数据分析

利用Pearson相关法分析雪岭云杉树轮宽度与气候因子的相关关系,考虑到上一年气候一般对树木生长有“滞后效应”^[40],因此,选择前一年6月至当年9月的气候因子进行相关性分析^[41],确定限制云杉径向生长的关键气候因子。然后将树轮宽度与气候因子进行滑动相关分析,自1960年开始,以30a为滑动窗口,1a为滑动步长,观察过去61a来云杉径向生长与气候因子相关性的动态变化。

利用树木径向生长变化百分率(Growth Change, GC)判定树木是否发生生长衰退^[42],为了减小个别特殊年份生长变化对结果的干扰,利用5a滑动平均计算雪岭云杉GC^[30]。计算公式如下:

$$GC_i = (M_2 - M_1) / M_1 \quad (1)$$

式中: GC_i 为树木在第 i 年的前后各 5 a 的径向生长变化率; M_1 和 M_2 分别为第 i 年的前 5 a (包括当年) 和后 5 a (不包括当年) 轮宽指数平均值。若 GC_i 为负值,表示树木径向生长受到抑制, $GC_i < -25\%$, 则表示树木发生了生长衰退。

抵抗力(Resistance, R_t)和恢复力(Recovery, R_c)计算公式如下^[14]:

$$R_t = G_d / G_{\text{pre}} \quad (2)$$

$$R_c = G_{\text{post}} / G_d \quad (3)$$

式中: G_d 表示干旱事件发生年的轮宽指数; G_{pre} 和 G_{post} 分别表示干旱事件发生前 4 a 和后 4 a 的平均轮宽指数。 $R_t > 0.75$ 表示树木对干旱事件有较强抵抗力, $R_c > 1.25$ 表示树木遭受干旱事件后有较高恢复力。需要说明的是,由于2020年之后没有对应的 G_{post} ,故该次干旱事件只计算抵抗力。

2 结果与分析

2.1 研究区气候变化

1960—2020年,研究区年平均最高气温、年平均气温、年平均最低气温均呈极显著上升趋势($P < 0.01$) (图3a), 上升速率分别为 $0.234^{\circ} \text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, $0.332^{\circ} \text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, $0.429^{\circ} \text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 研究区气温的上升主要由平均最低气温的快速上升呈现。降水以 $10.414 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的速率显著上升($P < 0.05$) (图

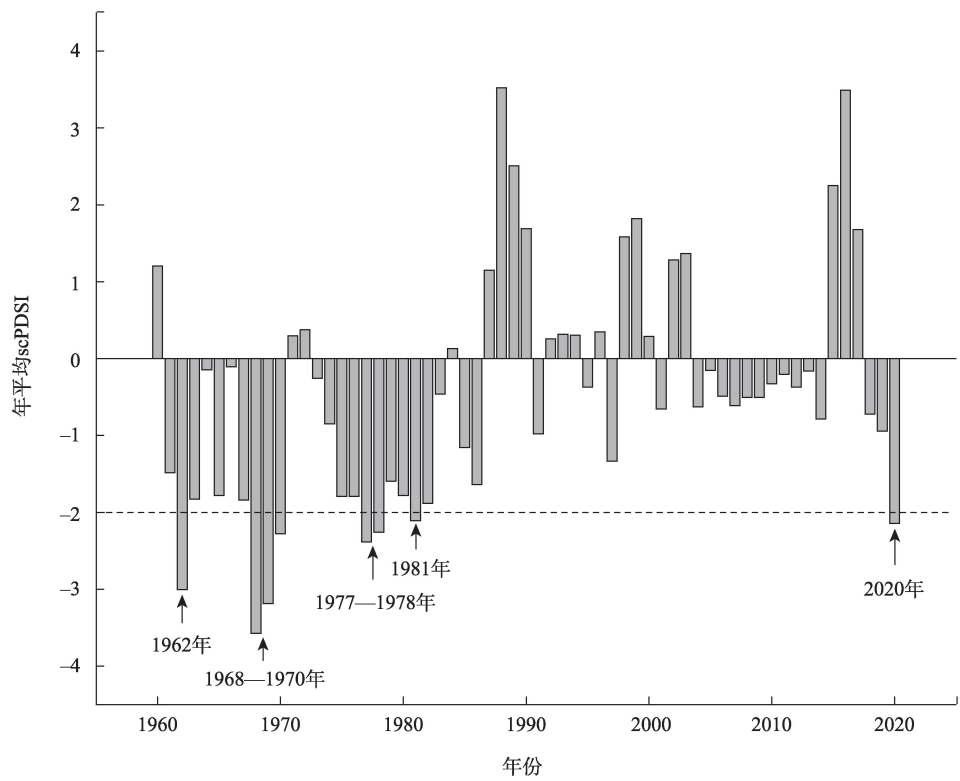


图2 干旱年份选取

Fig. 2 Selection of the drought years

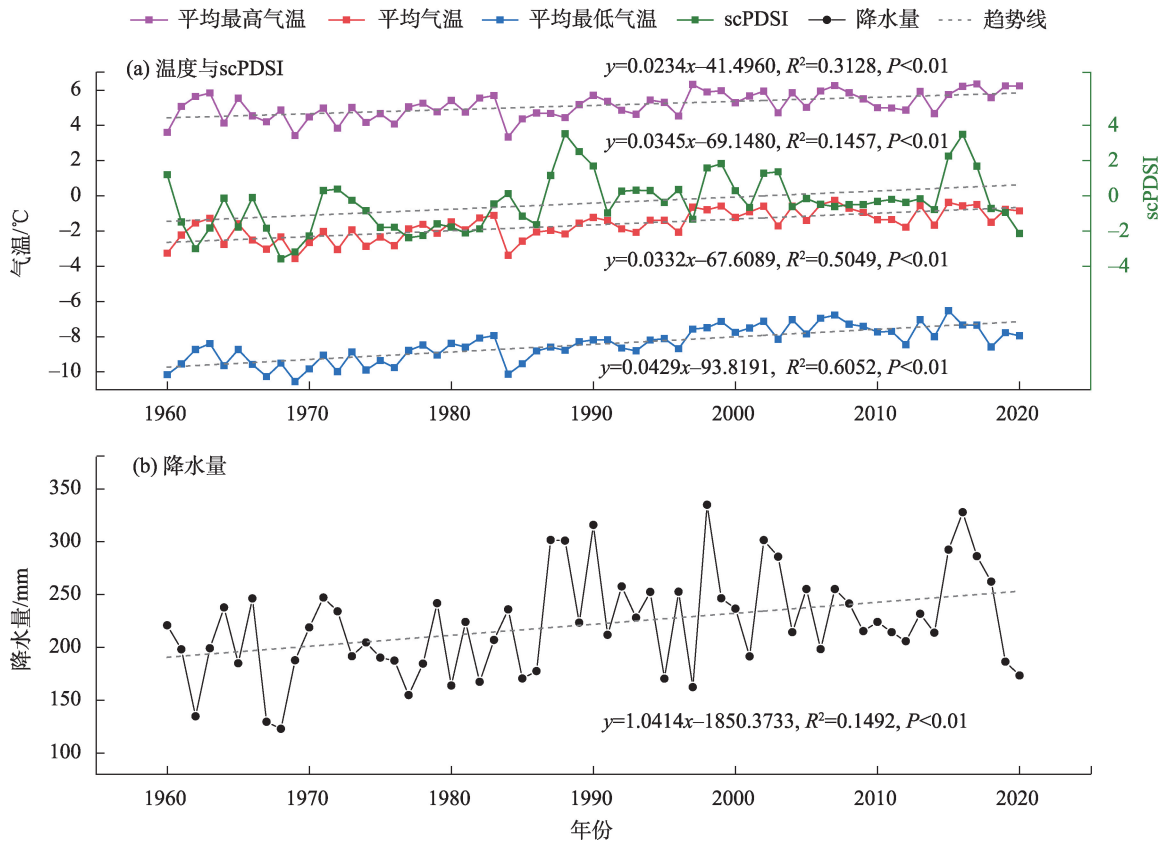


图3 研究区1960—2020年气温及降水量线性变化趋势

Fig. 3 Linear trends of temperature and precipitation in the study area from 1960 to 2020

3b)。

2.2 标准年表统计特征

为更好地保留年表的低频气候信息,建立树轮宽度标准化年表,主要统计特征值见表1。本年表平均敏感度(MS)和标准差(SD)较小,表明所含高频气候信息相对较少,信噪比(SNR)>4的年表较优^[31],本年表信噪比达到13.166,表明其承载了较多的气候信息。一阶自相关系数(AC1)为0.62,说明云杉径向生长受上一年气候因子的影响较大^[43]。样本总体解释量(EPS)为0.929,大于树木年轮气候学分析0.85的阈值要求,表明本年表能够代表研究区雪岭云杉径向生长的基本特征^[44]。选择子样本信号(SSS)>0.85的1842—2020年的年表进行径向生长变化率计算分析(图4)。

表1 雪岭云杉标准年表统计特征值

Tab. 1 Statistical features of tree ring width standardized chronology

年表特征	
样本量(芯/树)	47(28)
时间段	1805—2021年
平均敏感度(MS)	0.126
标准差(MD)	0.266
一阶自相关系数(AC1)	0.620
序列间相关系数(R)	0.219
树内相关系数(R1)	0.625
树间相关系数(R2)	0.212
信噪比(SNR)	13.166
样本总体解释量(EpS)	0.929
第一主成分方差解释量(pC1)/%	38.9
子样本信号(SSS)>0.85	1845年

2.3 树木径向生长变化及衰退过程

研究区雪岭云杉径向生长变化百分率在1879—1880年低于-25%(图5),表明其在1879—1885年发生了生长衰退。1960—2020年,雪岭云杉未发生生长衰退,且轮宽指数在该时间段呈极显著上升趋势($P<0.01$)(图4),表明其生长状况良好。

2.4 雪岭云杉应对干旱事件的抵抗力和恢复力

雪岭云杉应对该5次中等及以上干旱程度事件的抵抗力普遍较高(图6a),但在2020年干旱事件中 $R_t<0.75$,即云杉难以抵抗此次干旱事件带来的不利影响;云杉在遭受5次干旱事件后恢复力普遍较低(图6b),均小于1.25,表明研究区高海拔雪岭云杉

对于干旱事件有相对较强的抵抗力和较弱的恢复力。随干旱频率或干旱强度增加,雪岭云杉表现为抵抗力增加而恢复力减弱的趋势($P>0.05$)(图6c,图6d,图6e,图6f)。

2.5 雪岭云杉树轮宽度与气候因子的相关关系

在月尺度上,雪岭云杉树轮宽度主要与当年2月和6—7月平均最高气温显著正相关(图7);与上年6月和当年2月、6—8月平均气温显著正相关;与上年6—7月、10月、12月和当年1—3月、6—9月平均最低气温显著正相关;与当年4月降水显著正相关;与当年7月外的各月scPDSI显著正相关。在季尺度上,雪岭云杉树轮宽度主要与当年夏季平均最高气温显著正相关;与上年夏季、冬季和当年夏季平均气温显著正相关,与各季节平均最低气温显著正相关;与上年夏季降水显著正相关;与各季节scPDSI显著正相关。

雪岭云杉树轮宽度与当年7月各气温关系不稳定(图8),1986年以来,由不显著正相关关系向显著正相关关系转变;与当年1月降水关系不稳定,1979—2014年,由不显著正相关关系加强为显著正相关关系;与当年4月降水,上年9月、11—12月和当年1—6月scPDSI关系不稳定,1991年以来,由不显著正相关关系向显著正相关关系转变。

3 讨论

3.1 影响雪岭云杉径向生长的关键气候因子

雪岭云杉径向生长与绝大多数月份平均最低气温和scPDSI显著正相关($P<0.05$),而仅与当年4月的降水量显著正相关($P<0.05$)(图7)。云杉径向生长与上一年及当年生长季气温显著正相关($P<0.05$),生长季期间的光合速率主要取决于温度,在温度阈值以下,适宜的升温有利于提高叶片内相关酶的活性,加快光合作用积累大量碳水化合物,以供应树木当年和下一年的生长^[45-46]。与上一年10月,12月和当年1月,3月平均最低气温以及2月各气温显著正相关($P<0.05$),此时树木各组织器官生长基本停止,但光合作用仍在继续,且较高的温度有利于树木正常新陈代谢,防止树木活性组织免受冻伤^[47]。云杉径向生长与当年4月降水量显著正相关($P<0.05$),4月是雪岭云杉由休眠期进入生长期的关键时期,适度的降水有利于增加土壤含水量,可

ChinaXiv:202308.00679v1

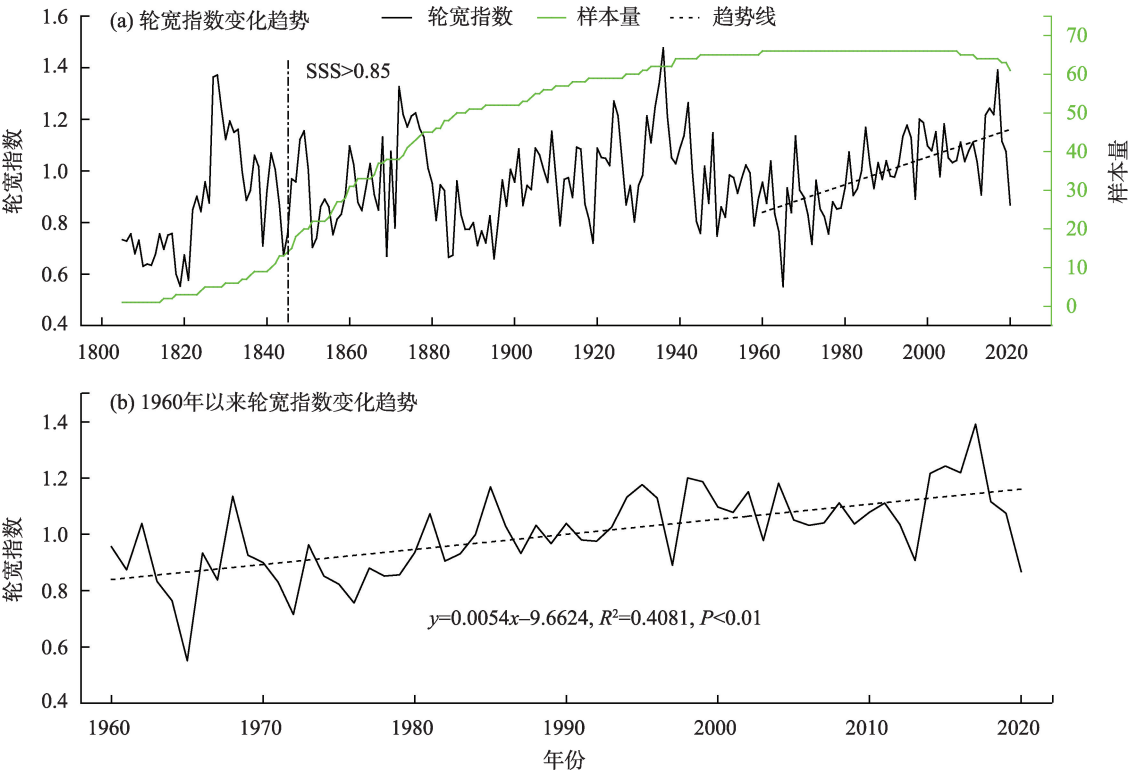
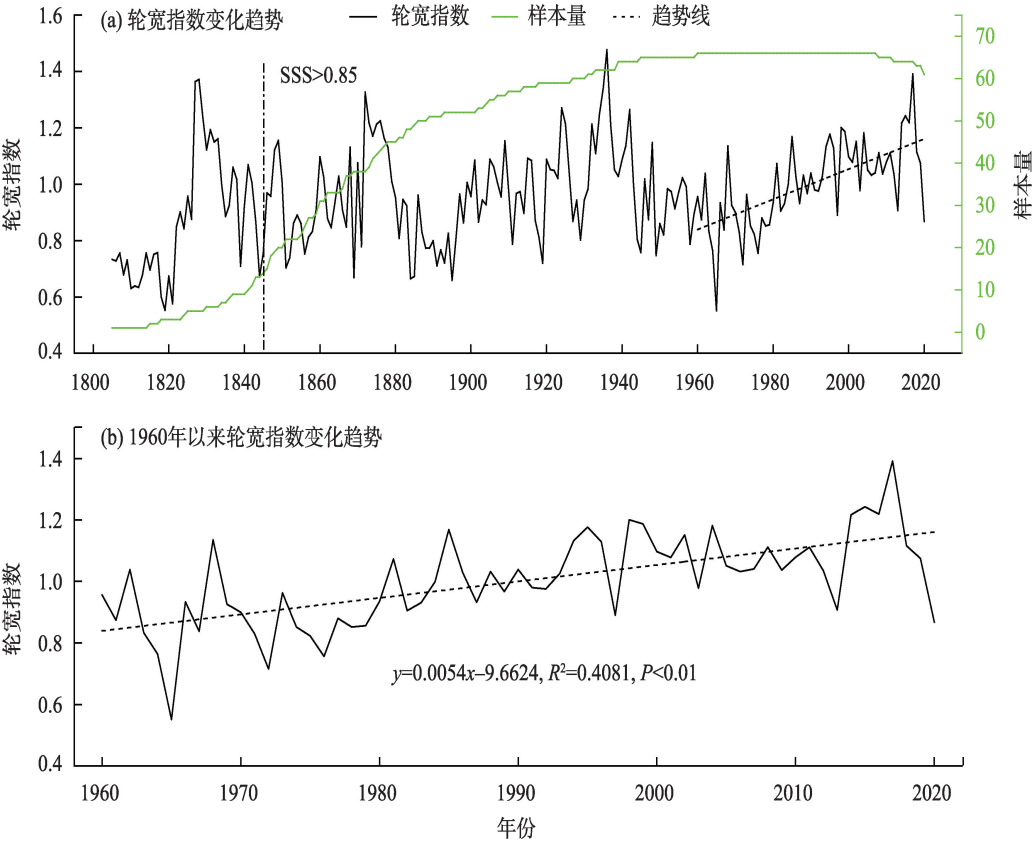


图4 树轮宽度指数

Fig. 4 Tree-ring width index



注:箭头指雪岭云杉生长历史中的衰退过程。

图5 径向生长变化百分率

Fig. 5 Percentage of radial growth change of *Picea schrenkiana*

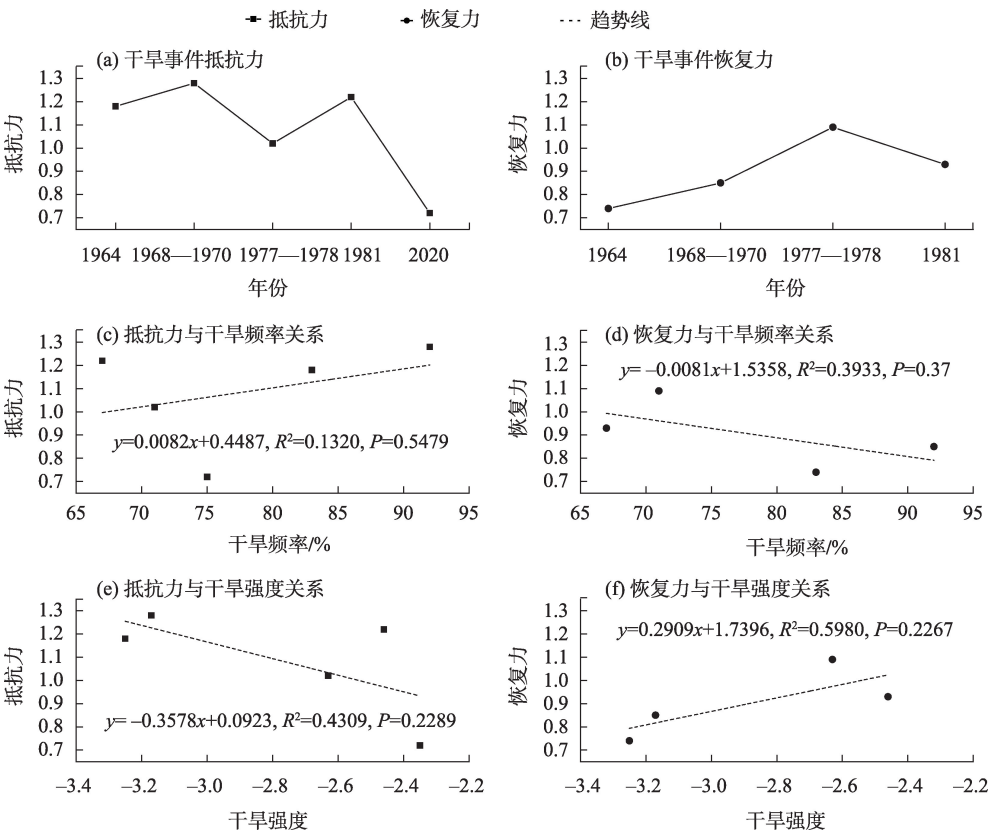
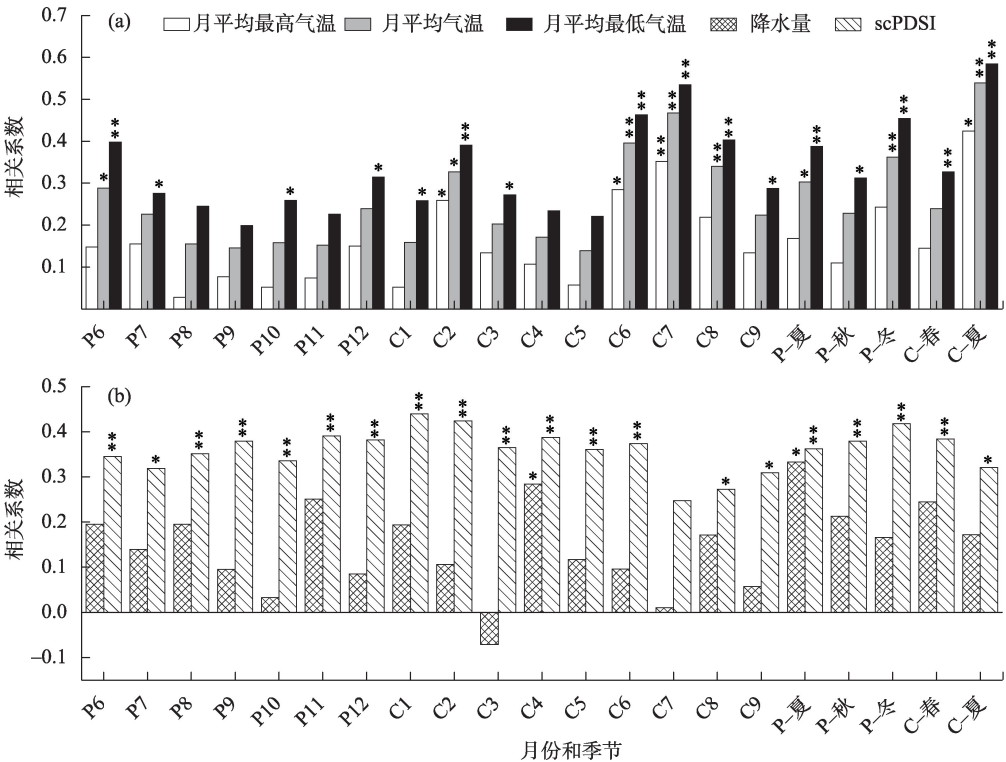


图6 雪岭云杉对5个干旱事件的抵抗力与恢复力

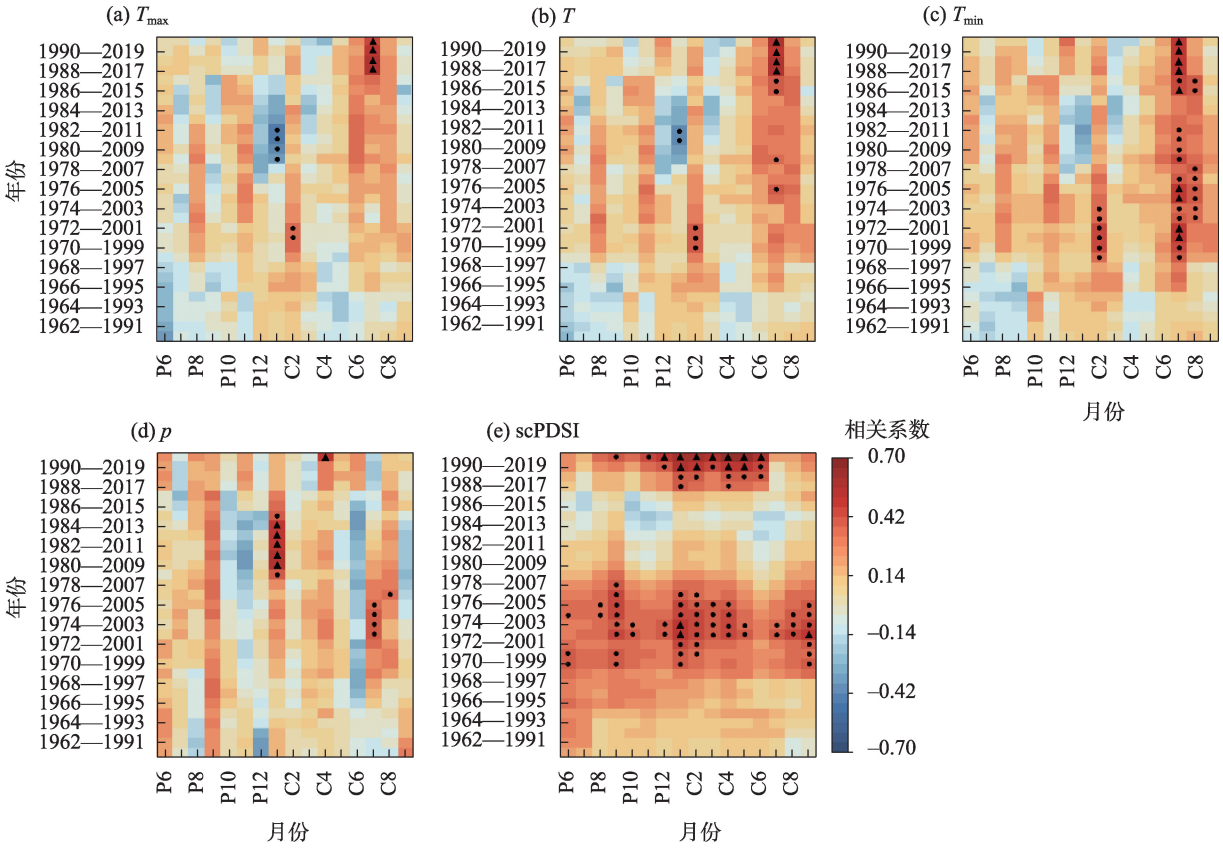
Fig. 6 Resistance and recovery of *Picea schrenkiana* to 5 drought events



注:P为前一年,C为当年;*表示在0.05水平上差异显著,**表示在0.01水平上差异显著。

图7 树轮宽度年表与气候因子的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between the tree-ring width chronologies and climatic factors



注：●表示在0.05水平上差异显著，▲表示在0.01水平上差异显著。

图8 树轮宽度年表与气候因子的滑动相关分析

Fig. 8 Moving correlation analysis between the tree-ring width chronologies and monthly climatic factors

加快形成层细胞的产生、分化和木质部的形成，也有助于树木提前进入生长季^[48-49]。

相较于降水，云杉与scPDSI和最低气温相关性更好，scPDSI是一个良好的干旱程度代用指标，scPDSI越小，表示树木可利用的土壤有效水分越少，受到干旱胁迫越严重，说明土壤水分条件和低温是限制高海拔云杉生长的关键因素，这与杜苗苗等^[37]对祁连山高海拔青海云杉和Fowler^[50]对落基山脉部分树种研究得出的结论一致。scPDSI由降水和气温共同决定，其中降水占主导作用，一般来说，scPDSI与气温负相关，与降水正相关，但图7显示，云杉径向生长与气温、降水和scPDSI均呈正相关，即气温和scPDSI有一定同步性变化，原因可能是采样点位于高海拔接近林线处，大部分降水以冰雪的形式存在，不能充分地融化于土壤供树木吸收利用，此时气温上升有利于增加土壤有效水分。虽然根本上scPDSI主要由降水决定，但是在本研究区，气温作为一个“启动器”存在，大部分时间里，地面和土壤里的冰雪需要较高温度融化才能供树木利用，因此

树木径向生长与气温、scPDSI和降水均为正相关关系，但相对降水来说，与气温和scPDSI的相关性更好。云杉径向生长与上一年6月至当年6月以及当年8—9月scPDSI均显著正相关，显著正相关月份占总月份的94%(图7)，这表明雪岭云杉对干旱响应敏感，干旱会导致云杉气孔导度下降，光合作用强度减弱，使CO₂同化速率降低而发生碳饥饿，进而使非结构性碳水化合物储备下降，限制形成层细胞活动和细胞增大等过程，致使云杉径向生长下降^[51-52]。

3.2 雪岭云杉径向生长对气候因子的动态响应

1960—2020年，研究区年平均气温上升速率高于全国平均水平0.26℃·(10a)⁻¹^[53]，但研究区高海拔雪岭云杉与各月气温呈正相关关系(图7)，且与部分月份气温有正相关加强趋势(图8)，说明气温仍是该处雪岭云杉的限制因子。1986年以后，云杉径向生长与当年生长季7月气温正相关加强，呈极显著正相关(P<0.01)(图8)，表明云杉对7月气温的敏感性显著提高。高海拔温度低而降水较多，树木生长主要受到低温限制，1960—1986年，7月平均最低

气温为4.24℃,1987—2020年,气温升高至5.26℃,类似的生长季气温升高促进高海拔树木生长的结论在横断山脉中部大叶桉和日本纪仓山白桦等相关研究中均有报道^[54-56]。

1979—2014年,云杉与当年1月降水正相关加强,呈显著正相关($P<0.05$)(图8),与1960—1978年相比,此时间段内降水量增加了35%,1月降水以降雪的形式补充,降雪增加可加厚地面雪被,防止冬季低温及冷空气将根系冻害^[57],还可以使土壤保持较高土温和墒情,增加生长季前期水分储备^[58]。1991—2020年,云杉径向生长与4月降水正相关进一步加强(图8),呈极显著正相关($P<0.01$),较之1960—1990年,此时间段4月平均降水量增加了4.9 mm,而在研究区降水增加的同时,快速升温导致云杉光合作用和蒸腾作用加强,耗水量随之增加,云杉生长对降水的敏感性进一步提高。

土壤有效水分是限制半干旱区森林植被格局的决定性因子^[59],1991—2020年,云杉径向生长与上一年12月至当年6月scPDSI相关性加强,呈极显著正相关($P<0.01$)(图8)。1960—1990年,此月份段平均scPDSI为-0.83,土壤水分条件较差,已属于初旱,1991—2020年上升至0.1,回归正常范围,随着土壤水分条件的改善,云杉径向生长加快,对scPDSI敏感性提高,这与前人得出的天山雪岭云杉生长主要受土壤水分条件限制的结论一致^[26,60]。研究区高海拔雪岭云杉树轮宽度对这些月份温度、降水和scPDSI正响应加强,说明限制此处雪岭云杉生长的关键气候因子是低温和干旱胁迫。

3.3 雪岭云杉生长衰退历史及对干旱事件的响应

雪岭云杉径向生长变化百分率在1879—1880年低于-25%(图5),表明其在1879—1885年发生了生长衰退。发生此次生长衰退之前的较长时间内,正好处于秦莉^[61]在临近本研究区的头屯河流域和崔宇^[62]在乌鲁木齐河源进行气候重建得到的降水偏湿阶段(1869—1874年;1865—1876年),这种水分充足的优良环境非常适合耐阴、耐寒、喜湿润的雪岭云杉生长,而生长衰退期又正处于姜盛夏等^[63]对天山区域气候重建得到的偏干时期(1876—1886年)和偏暖时期(1857—1893年),偏干和偏暖重叠时期发生干旱事件的概率极大,有研究表明^[64],在

多年代的气候波动中,当树木长期处在湿润的阶段中,会发生诸如叶片增加,根生长减缓,木质部抗栓塞能力减弱等生理结构变化,导致树木抗旱能力下降,而抵抗力较低的树木在遭遇长时间干旱时更易发生生长衰退^[20],这可能是云杉发生此次生长衰退的主要原因。

非致死性干旱能提高植物的抗旱能力,树木通过控制叶面积、调节气孔导度等生理生态策略来抵抗干旱胁迫^[64]。在5次干旱事件中,抵抗力在2020年干旱事件中最低(图6a)。分析可知,2020年干旱频率为75%,干旱强度为-2.3,值得注意的是,本次干旱的强度相对其他7次并不高,但树木抵抗力却为5次干旱事件中最低值,仅为0.72,小于0.75临界值,即表明云杉对此次干旱事件未能有效抵抗,1987年以来研究区scPDSI呈上升趋势(图2),干旱发生之前,2015—2019年的平均scPDSI为1.15,已达到轻微湿润水平,在云杉各项生理特征尤其是水力结构已逐渐适应水分较充足的生长环境后,遭遇突发的干旱导致树木难以抵抗^[64],2020年抵抗力严重下降可能与1875—1885年雪岭云杉生长衰退原因一致。

恢复力在1962年和1968—1970年相对较低(图6b),1962年干旱频率为83%,干旱强度为-3.25,已达到严重干旱水平,严重干旱会导致树木水分亏缺,使木质部管胞气穴化和栓塞,树木水分运输能力下降,影响树木正常生理活动,导致径向生长下降^[19,65]。1968—1970年,干旱频率达到了92%,干旱强度为-3.17,本次干旱事件不仅频率、强度大,而且持续时间久,干旱持续时间越久对树木的伤害也越大^[66],本次持续3 a之久的干旱可能对雪岭云杉造成了较大的生理损伤,使干旱期间的径向生长严重下降。这说明干旱频率高,干旱强度大都会影响树木的恢复力,这与相关研究得到的结论一致^[67-68]。但本研究因筛选的干旱事件较少,样本量不充足,导致恢复力和抵抗力随干旱频率与干旱强度的变化趋势不显著,后续应加强长时间尺度上的相关研究。综上所述,在气候持续变暖、干旱事件频发的情景下,未来一段时期,研究区高海拔雪岭云杉势必会在升温促进生长和干旱抑制生长间更频繁地波动,最终产生何种结果需进一步观察,未来应采取多种

手段,如加强木材解剖,微树芯采集,年内、季内、日内各时间段的径向生长监测力度等,探究树木径向生长变化动态,明晰雪岭云杉林的发展方向。

4 结论

1960—2020年,以升温为主的气候变化促进了研究区高海拔雪岭云杉径向生长。雪岭云杉树轮宽度主要与当年6—8月气温,4月降水及除当年7月外的各月scPDSI显著正相关,雪岭云杉对土壤有效水分,生长季气温以及4月降水的正响应加强,雪岭云杉依赖升温解除低温限制的同时,也受到升温引起土壤有效水分缺失的影响,低温和干旱胁迫成为限制研究区雪岭云杉径向生长的主要因素。高海拔雪岭云杉应对干旱的策略是高抵抗力和弱恢复力,随干旱频率和干旱强度的增加,雪岭云杉的抵抗力和恢复力下降,而当云杉长时间处于水分充足的环境中,抵御干旱的能力会下降,此时遭受干旱事件最易导致径向生长严重下降甚至发生生长衰退,预测气候变化背景下未来雪岭云杉林发展方向和探究其可持续抚育经营策略时应尤其注意此现象。

参考文献(References):

- [1] Gazol A, Camarero J J. Functional diversity enhances silver fir growth resilience to an extreme drought[J]. *Journal of Ecology*, 2016, 104(4): 1063–1075.
- [2] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(2): 52–58.
- [3] 姚俊强, 毛炜峰, 陈静, 等. 新疆气候“湿干转折”的信号和影响探讨[J]. *地理学报*, 2021, 76(1): 57–72. [Yao Junqiang, Mao Weiyi, Chen Jing, et al. Signal and impact of wet-to-dry shift over Xinjiang, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 57–72.]
- [4] Andreu L, Gutierrez E, Macias M, et al. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(4): 804–815.
- [5] Zhang L, Jiang Y, Zhao S, et al. Different responses of the radial growth of conifer species to increasing temperature along altitude gradient: *Pinus tabulaeformis* in the Helan Mountains (Northwestern China)[J]. *Polish Journal of Ecology*, 2016, 64(4): 509–525.
- [6] 赵守栋, 何新, 张冰琦, 等. 贺兰山东坡高山林线青海云杉(*Picea crassifolia*)径向生长对气候因子的响应[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(5): 501–505. [Zhao Shoudong, He Xin, Zhang Bingqi, et al. Response of tree radial growth of *Picea crassifolia* to climate factors in eastern slope of Helan Mountain[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2013, 49(5): 501–505.]
- [7] 赵莹, 蔡立新, 靳雨婷, 等. 暖干化加剧东北半干旱地区油松人工林径向生长的水分限制[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3459–3467. [Zhao Ying, Cai Lixin, Jin Yuting, et al. Warming-drying climate intensifies the restriction of moisture on radial growth of *Pinus tabulaeformis* plantation in semi-arid area of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(10): 3459–3467.]
- [8] 赵晓娟, 魏江生, 吕静, 等. 大兴安岭南段山杨不同龄组径向生长对极端干旱的响应[J]. *温带林业研究*, 2020, 3(4): 12–18. [Zhao Xiaojuan, Wei Jiangsheng, Lv Jing, et al. Response of radial growth to extreme drought in different age groups of *Populus davidiana* in southern Great Xing'an Mountains[J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2020, 3(4): 12–18.]
- [9] Cahoon S M, Sullivan P F, Brownlee A H, et al. Contrasting drivers and trends of coniferous and deciduous tree growth in interior Alaska[J]. *Ecology*, 2018, 99(6): 1284–1295.
- [10] Liu H, Park Williams A, Allen C D, et al. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(8): 2500–2510.
- [11] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660–684.
- [12] Sidor C G, Popa I, Vlad R, et al. Different tree-ring responses of Norway spruce to air temperature across an altitudinal gradient in the Eastern Carpathians (Romania)[J]. *Trees*, 2015, 29: 985–997.
- [13] Reyer C P, Brouwers N, Rammig A, et al. Forest resilience and tipping points at different spatio-temporal scales: Approaches and challenges[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 103(1): 5–15.
- [14] Lloret F, Keeling E G, Sala A. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests[J]. *Oikos*, 2011, 120(12): 1909–1920.
- [15] Amoroso M M, Daniels L D, Larson B C. Temporal patterns of radial growth in declining *Austrocedrus chilensis* forests in Northern Patagonia: the use of tree-rings as an indicator of forest decline[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 265: 62–70.
- [16] Song L, Li M, Zhu J, et al. Comparisons of radial growth and tree-ring cellulose $\delta^{13}\text{C}$ for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in natural and plantation forests on sandy lands[J]. *Journal of Forest Research*, 2017, 22(3): 160–168.
- [17] Qi Z, Liu H, Wu X, et al. Climate-driven speedup of alpine treeline forest growth in the Tianshan Mountains, Northwestern

- China[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 816–826.
- [18] D'orangeville L, Duchesne L, Houle D, et al. Northeastern North America as a potential refugium for boreal forests in a warming climate[J]. *Science*, 2016, 352(6292): 1452–1455.
- [19] Sun S, Lei S, Jia H, et al. Tree-ring analysis reveals density-dependent vulnerability to drought in planted Mongolian pines[J]. *Forests*, 2020, 11(1): 98.
- [20] 张瑞波. 基于树轮的中亚西天山干湿变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Zhang RuiBo. Tree-ring-Based Drought Variability in Western Tianshan Mountains, Central Asia[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]
- [21] 胡文峰, 陈玲玲, 姚俊强, 等. 近55年来新疆多时间尺度干旱格局演变特征[J]. *人民珠江*, 2019, 40(11): 1–9, 27. [Hu Wenfeng, Chen Lingling, Yao Junqiang, et al. Evolution characteristics of drought patterns at multiple timescales in Xinjiang for last 55 years[J]. *Pearl River*, 2019, 40(11): 1–9, 27.]
- [22] Zhang RuiBo, Yuan Yujiang, Gou X, et al. Intra-annual radial growth of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) and its response to climate on the northern slopes of the Tianshan Mountains[J]. *Dendrochronologia*, 2016, 40: 36–42.
- [23] 秦莉, 尚华明, 喻树龙, 等. 全球变化背景下天山西部雪岭云杉径向生长和水分利用效率对气候要素的响应[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2021, 15(3): 1–9. [Qin Li, Shang Huaming, Yu Shulong, et al. Response of tree-ring growth of *Picea schrenkiana* to climate change in the Sayram Lake Basin, Xinjiang, China[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2021, 15(3): 1–9.]
- [24] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 天山云杉和西伯利亚落叶松的树轮气候记录[J]. *生态环境学报*, 2005, 14(4): 460–465. [Peng Jianfeng, Gou Xiaohua, Chen Fahu, et al. Climatic records of tree-ring width in *Picea schrenkiana* Fisch and *Larix sibirica* Ledb[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4): 460–465.]
- [25] 张艳静, 于瑞德, 郑宏伟, 等. 天山东西部雪岭云杉径向生长对气候变暖的响应差异[J]. *生态学报*, 2017, 36(8): 2149–2159. [Zhang Yanjing, Yu Ruide, Zheng Hongwei, et al. Difference in response of radial growth of *Picea schrenkiana* to climate warming in the eastern and western Tianshan Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(8): 2149–2159.]
- [26] 石仁娜·加汗, 张同文, 喻树龙, 等. 天山不同海拔雪岭云杉径向生长对气候变化的响应[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(2): 327–338. [Shirena Jiahan, Zhang Tongwen, Yu Shulong, et al. *Picea schrenkiana* response to climate change at different altitudes in Tianshan Mountains[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 28(2): 327–338.]
- [27] 喻树龙, 袁玉江, 秦莉, 等. 天山北坡中部不同海拔高度雪岭云杉树轮宽度气候响应对比分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2016, 10(3): 30–38. [Yu Shulong, Yuan Yujiang, Qin Li, et al. Tree-ring-width growth responses of *Picea schrenkiana* to climate change for different elevations in the Central Tianshan Mountains[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2016, 10(3): 30–38.]
- [28] Jiao L, Chen K, Wang S J, et al. Stability evaluation of radial growth of *Picea schrenkiana* in different age groups in response to climate change in the eastern Tianshan Mountains[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(7): 1735–1748.
- [29] 秦莉, 尚华明, 张同文, 等. 天山南北坡树轮稳定碳同位素对气候的响应差异[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5713–5724. [Qin Li, Shang Huaming, Zhang Tongwen, et al. Response comparison of the tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ to climate on the southe and northern slopes of Tianshan Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5713–5724.]
- [30] Speer J H. *Fundamentals of Tree-Ring Research*[M]. University of Arizona Press, 2010.
- [31] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69–78.
- [32] Cook E R. *A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization*[D]. Arizona: University of Arizona Tucson, 1985.
- [33] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 英国CRU高分辨率格点资料揭示的20世纪中国气候变化[J]. *大气科学*, 2006, 30(5): 893–904. [Wen Xinyu, Wang Shaowu, Zhu Jinhong, et al. An overview of China climate change over the 20th Century using UK UEA/CRU high resolution grid data[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(5): 894–904.]
- [34] 黄秋霞, 赵勇, 何清. 基于CRU资料的中亚地区气候特征[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(3): 396–403. [Huang Qiuxia, Zhao Yong, He Qing, et al. Climatic characteristics in Central Asia based on CRU data[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(3): 396–403.]
- [35] 吕朝阳, 贡瑞鑫, 吴涛, 等. 寒温带森林白桦径向生长的海拔差异及其气候响应——以奥克里堆山为例[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 1889–1897. [Lyu Zhaoyang, Yun Ruixin, Wu Tao, et al. Altitudinal differentiation in the radial growth of *Betula platyphylla* and its response to climate in cold temperate forest: A case of Oakley Mountain, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 1889–1897.]
- [36] 郭冬, 吐尔逊·哈斯木, 吴秀兰, 等. 四种气象干旱指数在新疆区域适用性研究[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2022, 16(3): 90–101. [Guo Dong, Tursun Kasim, Wu Xiulan, et al. Applicability of four meteorological drought indices in Xinjiang[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2022, 16(3): 90–101.]
- [37] 杜苗苗, 张芬, 勾晓华, 等. 祁连山中东部青海云杉径向生长对气候变暖的响应差异[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(1): 14–23. [Du Miaomiao, Zhang Fen, Gou Xiaohua, et al. Different responses of radial growth of *Picea crassifolia* to climate warming in the middle and eastern Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(1): 14–23.]
- [38] 卫捷, 马柱国. Palmer干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较[J]. *地理学报*, 2003, 58(1): 117–124. [Wei Jie, Ma Zhuguo.

- Comparison of Palmer drought severity index, percentage of precipitation anomaly and surface humid index[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 117–124.]
- [39] 李晓琴, 张凌楠, 曾小敏, 等. 黄土高原中部针叶树与灌木径向生长对气候的响应差异[J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5685–5697. [Li Xiaoqin, Zhang Lingnan, Zeng Xiaomin, et al. Different response of conifer and shrubs radial growth to climate in the middle Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5685–5697.]
- [40] 张赞, 尹定财, 张卫国, 等. 普达措国家公园2个针叶树种径向生长对温度和降水的响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5383–5392. [Zhang Yun, Yin Dingcai, Zhang Weiguo, et al. Response of radial growth of two conifers to temperature and precipitation in Potatso National Park, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15): 5383–5392.]
- [41] 王婷, 于瑞德, 杨美琳, 等. 天山中部山区不同胸径天山云杉对气候的响应[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(4): 579–585. [Wang Ting, Yu Ruide, Yang Meilin, et al. Diameter-dependent growth responses of *Picea schrenkiana* to climate in the middle brae of Tianshan Mountain[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, 22(4): 579–585.]
- [42] Nowacki G J, Abrams M D. Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement-origin oaks [J]. *Ecological Monographs*, 1997, 67(2): 225–249.
- [43] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立[J]. *地理学报*, 1994, 49(2): 174–181. [Shao Xuemei, Wu Xiangding. Tree-ring chronologies for *Pinus armandi* franch from Huashan, China[J]. *Acta Geographica sinica*, 1994, 49(2): 174–181.]
- [44] Wigley T M, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1984, 23(2): 201–213.
- [45] Salzer M W, Hughes M K, Bunn A G, et al. Recent unprecedented tree-ring growth in bristlecone pine at the highest elevations and possible causes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(48): 20348–20353.
- [46] Jiang P, Liu H, Wu X, et al. Tree-ring-based SPEI reconstruction in central Tianshan Mountains of China since A.D. 1820 and links to westerly circulation[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37: 11–17.
- [47] 姜庆彪, 赵秀海, 高露双, 等. 不同径级油松径向生长对气候的响应[J]. *生态学报*, 2012, 32(12): 3859–3865. [Jiang Qingbiao, Zhao Xiuhai, Gao Lushuang, et al. Growth response to climate in Chinese pine as a function of tree diameter[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(12): 3859–3865.]
- [48] 乔晶晶, 王童, 潘磊, 等. 不同海拔和坡向马尾松树轮宽度对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2231–2240. [Qiao Jingjing, Wang Tong, Pan Lei, et al. Responses of radial growth to climate change in *Pinus massoniana* at different altitudes and slopes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(7): 2231–2240.]
- [49] Chu H, Xiang X, Yang J, et al. Effects of slope aspects on soil bacterial and arbuscular fungal communities in a boreal forest in China[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(2): 226–234.
- [50] Fowler A. Comment on Malanson(2017) “Mixed signals in trends of variance in high-elevation tree ring chronologies” published in *Journal of Mountain Science*[J]. *Science*, 2018, 15(2): 444–446.
- [51] Parker J, Patton R L. Effects of drought and defoliation on some metabolites in roots of black oak seedlings[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1975, 5(3): 457–463.
- [52] 鲁芮伶, 杜莹, 晏黎明, 等. 森林树木死亡的判定方法及其应用综述[J]. *科学通报*, 2019, 64(23): 2395–2409. [Lu Ruiling, Du Ying, Yan Liming, et al. A methodological review on identification of tree mortality and their applications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(23): 2395–2409.]
- [53] 梅梅, 侯威, 周星妍. 新、旧气候态差异及对中国地区气候和极端事件评估业务的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(6): 653–669. [Mei Mei, Hou Wei, Zhou Xingyan. The difference between new and old climate states and its impact on the assessment of climate and extreme event in China[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(6): 653–669.]
- [54] Takahashi K, Tokumitsu Y, Yasue K. Climatic factors affecting the tree-ring width of *Betula ermanii* at the timberline on Mount Norikura, central Japan[J]. *Ecological Research*, 2005, 20(4): 445–451.
- [55] Panthi S, Bräuning A, Zhou Z, et al. Growth response of *Abies georgei* to climate increases with elevation in the central Hengduan Mountains, southwestern China[J]. *Dendrochronologia*, 2018, 47: 1–9.
- [56] Esper J, Schweingruber F H, Winiger M. 1300 years of climatic history for western Central Asia inferred from tree-rings[J]. *The Holocene*, 2002, 12: 267 – 277.
- [57] 吴燕良, 甘淼, 于瑞德. 天山东部西伯利亚落叶松径向生长对气候的响应及其物候模拟[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(6): 1301–1311. [Wu Yanliang, Gan Miao, Yu Ruide. Effect of climate on the radial growth of *Larix sibirica* and its phenological features in the eastern Tianshan Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(6): 1301–1311.]
- [58] Vaganov E, Hughes M, Kirdyanov A, et al. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia[J]. *Nature*, 1999, 400(6740): 149–151.
- [59] Liu H, Yin Y, Wang Q, et al. Climatic effects on plant species distribution within the forest-steppe ecotone in northern China[J]. *Applied Vegetation Science*, 2015, 18(1): 43–49.
- [60] 吴燕良, 甘淼, 于瑞德, 等. 基于树轮生理模型的雪岭云杉径向

生长的模拟研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 64–71. [Wu Yanliang, Gan Miao, Yu Ruide, et al. Process-based modeling radial growth of *Picea schrenkiana* in the eastern Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 64–71.]

[61] 秦莉. 新疆天山中部北坡头屯河及三屯河流域树木年轮气候研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2010. [Qi Li. The Dendroclimatology Study on Toutun River Basins and Santun River Basins on the North Slope of Middle Tianshan Mountains, Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2010.]

[62] 崔宇. 天山北坡乌鲁木齐河源过去 470 a 春季(4—5 月)气候变化的重建与分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2005. [Cui Yu. Reconstruction and Analysis of the Past 470 Years’ Spring Climate Change in the Urumqi River Source on the Northern Slope of Tianshan Mountain[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2005.]

[63] 姜盛夏, 张同文, 喻树龙, 等. 天山和阿尔泰山历史气候变化序列集成重建研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(3): 102–111. [Jiang Shengxia, Zhang Tongwen, Yu Shulong, et al. Integrated reconstruction of the historical climate series for the Tianshan Moun-

tains and the Altay Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2022, 16(3): 102–111.]

[64] McDowell N, Pockman W T, Allen C D, et al. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought?[J]. New phytologist, 2008, 178 (4): 719–739.

[65] Jactel H, Petit J, Desprez-Loustau M L, et al. Drought effects on damage by forest insects and pathogens: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2012, 18(1): 267–276.

[66] Anderegg W R, Trugman A T, Badgley G, et al. Divergent forest sensitivity to repeated extreme droughts[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(12): 1091–1095.

[67] Serra-Maluquer X, Mencuccini M, Martínez-Vilalta J. Changes in tree resistance, recovery and resilience across three successive extreme droughts in the northeast Iberian Peninsula[J]. Oecologia, 2018, 187(1): 343–354.

[68] Brodribb T J, Powers J, Cochard H, et al. Hanging by a thread? Forests and drought[J]. Science, 2020, 368(6488): 261–266.

Radial growth response of *Picea schrenkiana* to climate change in the middle section of the northern slope of the Tianshan Mountains

ZHOU Xiaodong^{1,2}, CHANG Shunli^{1,2}, WANG Guanzheng^{1,2},
ZHANG Yutao^{2,3}, YU Shulong⁴, ZHANG Tongwen⁴

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology under the Ministry of Education, College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2. Tianshan Forest Ecosystem National Station, Urumqi 830063, Xinjiang, China; 3. Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, Xinjiang, China; 4. Key Laboratory of Tree-Ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration, Xinjiang Laboratory of Tree Ring Ecology, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Analyzing the response of tree radial growth to climate change is crucial for accurately predicting the dynamic changes in forests in the future. The temperate coniferous forest, dominated by *Picea schrenkiana*, is widely distributed in the mid-mountain zone on the northern slope of the Tianshan Mountains. In this study, core samples of high-altitude *Picea schrenkiana* were collected, and the response characteristics of *Picea schrenkiana* radial growth to climatic factors and drought events were explored using tree-ring analysis. The results showed the following: (1) From 1960 to 2020, the tree-ring width index of *Picea schrenkiana* showed a significant upward trend without any growth recession, indicating favorable growth conditions in recent years. (2) The tree-ring width of *Picea schrenkiana* was mainly positively correlated with temperature from June to August, precipitation in April, and scPDSI in all months except July. Sliding correlation analysis showed an unstable relationship between tree-ring width and climatic factors. After 1991, the positive response of spruce to climatic factors was further strengthened. (3) The percentage of radial growth change in *Picea schrenkiana* was less than -25% from 1879 to 1880, indicating a growth decline from 1879 to 1885. An increase in drought frequency and intensity resulted in a decrease in the resistance and resilience of *Picea schrenkiana* to drought events. When *Picea schrenkiana* was in a relatively sufficient water environment for a long time and suffered from sudden drought events, it exhibited a significant decline in resistance and was prone to growth decline. In summary, under the influence of climate change, warming is still expected to promote the radial growth of high-altitude *Picea schrenkiana* in the region in the near future. However, the increase in the frequency and intensity of drought events during the warming process will further reduce the resistance and resilience of *Picea schrenkiana*, posing an increased risk of growth decline. In the near future, *Picea schrenkiana* will face the challenge of balancing growth promotion due to warming and growth inhibition due to drought. Further observation and research are required to understand the ultimate impact. In the future, various methods should be implemented to closely monitor the growth dynamics of *Picea schrenkiana*.

Keywords: *Picea schrenkiana*; tree ring; radial growth; climate change; resistance; recovery; northern slope of Tianshan Mountains